

# 静止軌道上におけるスペースデブリ衝突の 数値シミュレーションと高速衝突試験

安田 雄治 増田 望 福島 恵太  
法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

片山 雅英  
株式会社CRCソリューションズ

新井 和吉 田中 豊  
法政大学工学部機械工学科

本研究では、スペースデブリ衝突時における宇宙構造物構成材料の損傷機構を解明し、耐衝撃新素材の創製を最終目的としている。本報告では、静止軌道上におけるスペースデブリ衝突現象を想定し、スペースデブリと宇宙構造物バンパーシールド構成材料を模擬したステンレス鋼(SUS304)衝突材とアルミニウム合金(A6061-T6)被衝突材による高速衝突現象の数値シミュレーションおよび高速衝突試験を行った。数値シミュレーション結果と高速衝突試験結果を比較し、数値シミュレーションの妥当性および被衝突材巨視的貫通破壊メカニズムについて検討した。また、衝突材の先端形状を変化させ、被衝突材の貫通破壊メカニズムへの影響を検討した。さらに、衝突材としてプラスチック系材料であるポリエチレン、四フッ化エチレンおよびエポキシFRPを用いて、アルミニウム合金被衝突材への高速衝突試験を行い、被衝突材の貫通破壊に及ぼす衝突材各種因子の影響について考察を行った。

## 1. はじめに

21世紀には国際宇宙ステーションの運用をはじめとし、高度で多様な宇宙活動が見込まれる。しかしながら、地球の衛星軌道にはスペースデブリと呼ばれる“man-made”の宇宙ゴミが蓄積しており、これらが宇宙構造物に衝突し、甚大なダメージを与えることが問題になっている。このスペースデブリ衝突現象における衝突速度は、数 m/s から数十 km/s と広範である。そのため、宇宙構造物防護策は非常に重要な課題になっている。

そこで本研究では、宇宙構造物用耐衝撃新素材の創製のために、まず広範な衝突速度における材料損傷機構の解明を目的とした。また、スペースデブリに関する研究の中でも報告事例の少ない、静止軌道上におけるスペースデブリ衝突現象を想定した。ここで、静止軌道上におけるスペースデブリ衝突速度は、数 m/s から数百 m/s である<sup>[1]</sup>。この衝突速度域において、スペースデブリおよび宇宙構造物バンパーシールドを模擬した衝突材と被衝突材の組み合わせを種々変化させ、数値シミュレーションおよび高速衝突試験を行った。

## 2. 数値解析法

### 2.1 適用解析コードおよび基礎方程式

衝突現象のシミュレーションには、衝撃解析ソフト(AUTODYN-2D 株式会社CRCソリューションズ)を用いた。基礎方程式の立て方には、空間座標を時間の関数として記述し、あたかもその座標系の上に乗って移動するかのよう  
に扱うLagrangeの方法を使用した。

衝突現象の数値解析においては、連続体力学に基づき、質量、運動量、エネルギーの3つの保存則を表す基礎式と、物質の熱力学的特性を規定する状態方程式を連立させ、さらに物質の強度を規定する構成則も連立させた。

### 2.2 状態方程式および材料構成則

状態方程式には、高速衝突現象を想定しているため、Mie-Grüneisen型Shock Hugoniotモデル<sup>[2]</sup>を用いた。スペースデブリおよび宇宙構造物バンパーシールドを模擬した衝突材は、それぞれステンレス鋼(SUS304)およびアルミニウム合金(A6061-T6)とし、その構成則にはSteinberg-Guinanモデル<sup>[3]</sup>を用いた。

### 2.3 材料破壊モデル

高速衝突現象での衝突材貫通時における巨視的な破壊メカニズムとして、衝突圧により生じる相当塑性ひずみが限界に達することによる破壊を規定した。ここで、予備計算において破断応力による材料破壊を用いた解析も行なったが、高速衝突試験結果との良い一致が見られなかった。これは、衝突時における理論的な衝突圧は、低速度衝突現象においても、瞬間的に破断応力よりもはるかに高い値をとるためである。また、衝突速度の増加に伴い、理論上ではスポール強度に達する圧力が部分的に生じることになるが、今回使用した試験片の厚さが薄く変形しやすいため、スポール破壊による貫通破壊への影響は少ないと思われる。よって、巨視的な被衝突材貫通破壊メカニズムは、相当塑性ひずみによると仮定し、数値シミュレーションを行った。

規定した限界相当塑性ひずみ値は、各種アルミニウム合金の高速引張試験から得られる数種の破断ひずみ値<sup>[4]</sup>(0.3, 0.4, 0.5, 0.6)を用い、それぞれ検討を行った。

### 2.4 解析条件

衝突材のSUS304は直径9.5mmの球体とした。被衝突材のA6061-T6は直径100mmの円板とし、厚さを1.0mmと0.5mmの2種類に変化させた。境界条件としては、被

衝突材周囲を完全拘束とした。衝突速度は静止軌道上におけるスペースデブリ衝突速度である 50 m/s~500 m/s とし、衝突角度は垂直衝突とした。2次元軸対称解析により、衝突材が被衝突材に衝突する際の衝突材の運動挙動および被衝突材の変形・破壊挙動の解析を行った。

### 3. 高速衝突試験

数値解析結果の妥当性を検討するために、数値解析と同一材料の衝突材および被衝突材を使用し、最大衝突速度が約 400 m/s までの高速衝突試験を行った。衝突試験装置には試作中の飛翔体発射装置を用いた<sup>[5]</sup>。衝突前後の衝突材の速度測定には、高速度ビデオカメラ(㈱フクロン・FASTCAM-ultima)を使用した。

評価指標としては、衝突時における衝突材の速度変化と被衝突材の損傷挙動、および衝突後の被衝突材の変形・破損量を用いた。

## 4. 結果および考察

### 4.1 数値解析評価

数値解析結果の妥当性を検討するために、衝突速度 50m/s~400m/s の範囲において、解析結果と高速衝突試験結果の比較検討を行った。評価指標としては、衝突材の衝突前後の速度と被衝突材の変形・破損量を用いた。

Fig. 1 に、被衝突材厚さ 1.0 mm における数値解析と高速衝突試験結果の比較を示した。限界相当塑性ひずみ値を 0.5 とした場合において、衝突材の衝突後速度および被衝突材の貫通限界速度(横軸切片の速度)が概ね一致した。同様に、被衝突材の変形・破損量についても限界相当塑性ひずみ値を 0.5 とした場合にほぼ一致が得られた。

この結果、本研究における衝突速度域における数値解析の妥当性が示され、被衝突材の巨視的貫通破壊メカニズムは限界相当塑性ひずみに起因することがわかった。

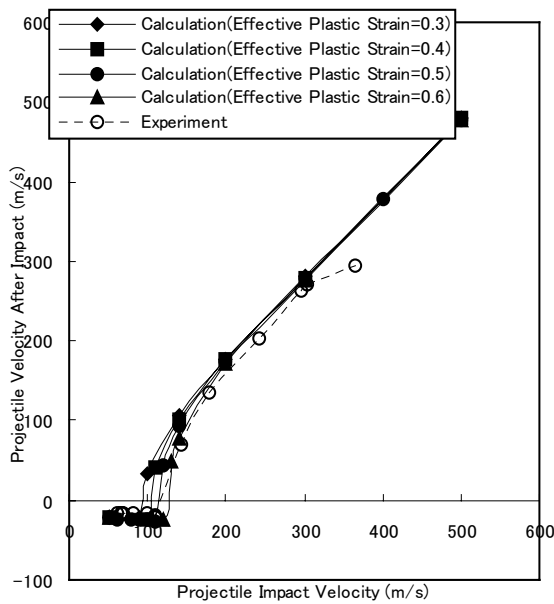


Fig.1 Comparison of calculation and test results.

## 4.2 各種衝突材による被衝突材貫通破壊への影響

### 4.2.1 衝突材の先端形状の影響

衝突材の先端形状が被衝突材の貫通破壊メカニズムに及ぼす影響を検討するために、衝突材の形状として、先端半球型シリンダーと先端平面シリンダーを用いて数値シミュレーションを行った。衝突材の SUS304 は、運動エネルギーおよび接触投影面積の影響を等しくするために、質量は 3 g、各シリンダー直径を 9.5 mm 一定とした。

Fig. 2 に、解析から得られた両衝突材の衝突速度と衝突後速度の関係を示した。また、両衝突材による貫通限界運動エネルギーを Table 1 に示した。また、衝突材を剛体として解析した結果もあわせて記載した。

Table 1 より、試験片を貫通破壊するのに必要な衝突材の貫通限界運動エネルギーは、試験片厚さの増加にほぼ比例して増加していることがわかる。

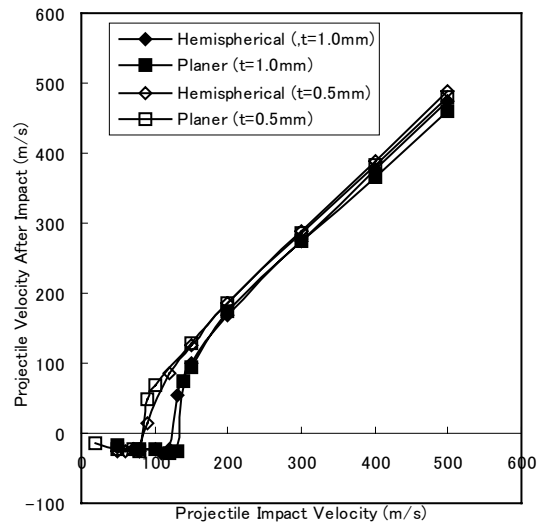


Fig.2 Calculation results of various nose-shaped Projectiles.

Table 1 Calculation results of ballistic limit velocity and ballistic limit kinetic energy of various nose-shaped projectiles.

Target thickness [mm]	Nose-shape	Ballistic limit velocity [m/s]	Ballistic limit kinetic energy [J]
1.0	Hemispherical	123	22.69
	Planar	133	26.53
	Hemispherical (Rigid Body)	123	22.69
	Planar (Rigid Body)	122	22.33
0.5	Hemispherical	86	11.09
	Planar	83	10.33
	Hemispherical (Rigid Body)	86	11.09
	Planar (Rigid Body)	83	10.33

球面接触と平面接触で貫通限界運動エネルギーが異なることは、衝突材の先端形状によって被衝突材の貫通破壊メカニズムが異なることを示している。Fig. 3 に、両衝突材衝突時における被衝突材の変形状況の解析結果を示した。半球形状の場合、衝突直後の衝突圧により、被衝突材は衝突材先端形状に沿うように背面方向に変形し、衝突材の侵徹が進行する。その後、先端半球部における衝突材中心軸から 30 度付近の接触部でひずみが限界塑性ひずみに達し、貫通破壊が生じている。平面形状では、衝突直後の衝突圧により、被衝突材の変形が生じ、接触面はシリンダー端面部に集中し、主にシリンダー端面におけるせん断貫通破壊となっている。

また、被衝突材厚さ 1.0 mm の先端平面シリンダー衝突材においてのみ、貫通限界運動エネルギーがやや高い。これは、衝突材を剛体とした解析結果から、衝突材の持つ運動エネルギーの一部が、衝突材自身の変形に費やされたためであることがわかる。

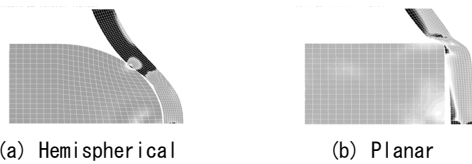


Fig. 3 Difference in deformation by nose-shape.

#### 4. 2. 2 衝突材の材質の影響

プラスチック系材料は、今後、宇宙構造物の構成材料としての需要が多く見込まれ、そのためスペースデブリ化の可能性が高い。しかしながら、その構成則は複雑であり、高速衝突現象の解析は困難である。そこで、物性の異なる 3 種のプラスチック系材料を選択し、衝突材の材質が被衝突材貫通破壊に及ぼす影響を実験的に検討した。プラスチック系衝突材には、ポリエチレン (PE)、四フッ化エチレン (PTFE)、エポキシ FRP (FRP) を選択した。比較のためステンレス鋼 (SUS304) も用いた。衝突材は、運動エネルギーおよび被衝突材との接触面形状を等しくするため、すべて質量 3 g、先端形状を半球とした直径 9.5 mm のシリンダーとした。

高速衝突試験結果を Fig. 4 に示した。また、各種衝突材における貫通限界速度から求めた貫通限界運動エネルギーを、衝突材材料物性とあわせ Table 2 に示した。これらの結果から、被衝突材厚さ 0.5 mm では、PTFE 衝突材のみが多少高い貫通限界運動エネルギーを必要とし、他の衝突材はほぼ同一の値であることがわかる。これは、PTFE が最も材料強度が低く、PTFE 自身の変形に運動エネルギーが費やされたためである。しかしながら、被衝突材厚さ 1.0 mm では、衝突材の材質により衝突材の衝突後速度および被衝突材の貫通限界速度が大きく異なっている。特に、材料強度の低い PTFE が PE よりも低い衝突速度で貫通が生じており、材料強度以外の影響があらわれていることが考えられる。一般的に、材料は超高速衝突になるにつれて流体的挙動を示し、強度よりも密度の影響が相対的に大きくなる<sup>[6]</sup>。そのため、被衝突材厚さの増加に伴う貫通限界速度の増加により、変形に寄与する材料機械的性質に加え、密度の影響が表れたものと思われる。

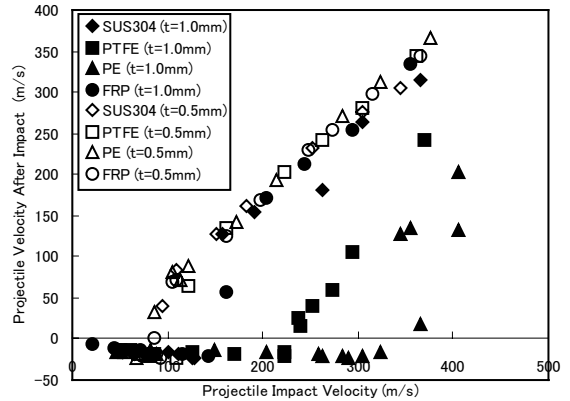


Fig. 4 Test results of various projectile materials.

Table 2 Test results of ballistic limit kinetic energy and properties of various projectile materials.

	Ballistic limit Kinetic energy [J]		Modulus of elasticity [GPa]	Tensile strength [MPa]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]
	t=0.5 mm	t=1.0 mm			
PE	10.33	159.4	1.08	30	0.950
PTFE	18.82	78.66	0.47	24	2.126
FRP	11.09	32.41	20.7	138	1.804
SUS304	11.09	26.53	196	713	7.93

#### 5. おわりに

静止軌道上におけるスペースデブリ衝突を模擬した数値シミュレーションを行い、SUS304 衝突材と A6061-T6 被衝突材の衝突時における被衝突材の巨視的な貫通破壊メカニズムは相当塑性ひずみによることがわかった。また、衝突材の先端形状と被衝突材の厚さおよび衝突材の材質を変化させた数値解析および高速衝突試験結果から、衝突材の先端形状、材質および被衝突材の厚さが、衝突材の衝突後速度および被衝突材の貫通限界速度に大きく影響することがわかった。

【謝辞】本研究は、法政大学計算科学研究センター、2002 年度研究プロジェクトとして遂行したものであり、同センターに感謝の辞を表します。

#### 参考文献

- [1]八坂哲雄, "宇宙のゴミ問題—スペースデブリ—", 裳華房, 1997 年 6 月.
- [2]S. P. Marsh (Ed.), "LASL Shock Hugoniot Data" ISBN 0-520-04008-2, University of California Press (1980)
- [3]Steinberg, Cochran, and Guinan, "A Constitutive Model For Metals Applicable At High-strain Rates.", J. Appl. Phys., 51, 3, March 1980.
- [4]向井敏司, 東健司, 土田信, 谷村眞治, "各種アルミニウム合金の引張特性に及ぼすひずみ速度の影響", 軽金属, 43, 5, 252-257, 1993.
- [5]特許公開 2003-014398.
- [6]Jonas A. Zukas, et al., "IMPACT DYNAMICS", John Wiley and Sons, Inc., 1982.



キーワード.

スペースデブリ、数値シミュレーション、高速衝突、静止軌道

.....

Summary.

**NUMERICAL SIMULATION AND HYPERVELOCITY IMPACT TEST  
OF SPACE DEBRIS IMPACT ON GEOSTATIONARY ORBIT**

Yuji Yasuda    Nozomu Masuda    Keita Fukushima

Graduate school, Hosei University

Masahide Katayama

CRC Research Institute, Inc.

Kazuyoshi Arai    Yutaka Tanaka

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

In this study, the numerical simulation and the hypervelocity impact test of a space debris collision phenomenon on geostationary orbit were investigated. The numerical simulation results were shown good agreements with the impact test results and the validity of the macroscopic penetration mechanism of collided material was shown. Further, hypervelocity impact tests using three kinds of plastic materials as collision materials were performed, and the effects of properties of plastic materials on the ballistic limit velocity (limit penetration velocity) of collided material were discussed.

Keywords.

space debris, numerical simulation, hypervelocity impact, geostationary orbit